

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Analýza tváření válcových skořepin

Forming Analysis of Cylindrical Shells

Student:

Zdeněk Polách

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Zdeněk Polách**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Analýza tváření válcových skořepin**
Forming Analysis of Cylindrical Shells

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií rotačního tváření rotačních skořepin
2. Metody predikce tvářecích parametrů tváření rotačních skořepin
3. Analýza tvářecích parametrů výroby hrdel tlakových lahví
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599
AVITZUR, B. *Handbook of Metal-Forming Processes*. New York: John Wiley and Sons, 1983
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674

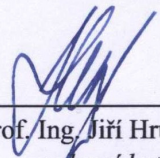
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

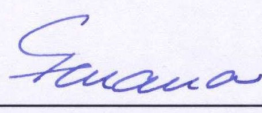
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 13. 5. 2011

Zdeněk Polách

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 23. 5. 2011

Zdeněk Polách

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: ZDENĚK POLÁCH

Adresa trvalého pobytu autora práce: ZAHRADNÍ 495, 788 15 VELKÉ LOSINY

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

POLÁCH, Z. *Analýza tváření válcových skořepin: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 43 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Bakalářská práce se zabývá analýzou tvářecích parametrů výroby hrdel tlakových lahví. Analýza je uskutečněna jako simulace procesu tváření pomocí programu QForm. Simulace je provedena pro rychlost přísuvu zápustky 250 mm/min pro lahve o průměru 360 mm. Materiálem polotovaru je chrom-molybdenová ocel 34CrMo4. Hlavním cílem práce je zpracovat hodnoty získané ze simulace, hlavně sílu, kroutící moment a výkon. Výsledné tvářecí parametry pak budou sloužit k návrhu nového kovacího stroje pro větší průměry ocelových lahví.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

POLÁCH, Z. *Forming Analysis of Cylindrical Shells: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2011, 43 s. Thesis head: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

The bachelor thesis focuses on the analyses of the forming parameters of the steel cylinders neck production. The analysis is carried out as a simulation of forming process using the QForm software. Simulation is done for die feed motion speed of 250 mm/min for cylinders with a diameter of 360 mm. The workpiece material is semi-chrome-molybdenum steel 34CrMo4. The main goal is to process the values obtained from the simulation, mainly force, torque and power. The gained forming parameters will be used to design a new forging machine for steel cylinders of a larger diameter.

Obsah

Seznam použitého značení a zkratk	7
1 Úvod	8
2 Rozbor technologií rotačního tváření rotačních skořepin	9
2.1 Zužování trubek v kuželové tažnici [1]	10
2.2 Zužování přehrnováním (obracením) [1]	12
2.3 Uzavírání konců trubek (zužováním) [1]	15
2.3.1 Operace se dělí na tři fáze:	16
2.4 Technické požadavky na tlakové nádoby pro přepravu plynů	18
2.4.1 Použité oceli a jejich chemické složení	18
2.4.2 Konstrukce a jakost provedení	19
2.4.3 Výpočet nejmenší tloušťky stěny [2]	19
2.4.4 Výroba ocelových tlakových nádob na plyny [3], [4]	20
3 Metody predikce tvářecích parametrů tváření hrdel tlakových lahví	22
3.1 Analytická metoda (membránová teorie) [1]	22
3.2 Metoda konečných prvků (MKP) [5]	23
3.2.1 Diskretizace	23
3.2.2 Aproximační funkce [5],[6]	24
3.2.3 Interpolace	25
4 Analýza tvářecích parametrů výroby hrdel tlakových lahví	26
4.1 Nastavení parametrů simulace v programu QForm – vstupní hodnoty	26
4.1.1 Materiál polotovaru	26
4.1.2 Zadané vstupní hodnoty	27
4.1.3 Modely zápustky a polotovaru	27
4.2 Podmínky zpracování výstupních dat z programu Qform	29
4.2.1 Stanovení úhlu styku	30
4.3 Tvářecí parametry získané ze simulace v programu QForm	31
4.4 Výpočet kroutícího momentu	36
4.5 Kontrola maximální síly a deformace analytickým výpočtem	38
4.5.1 Kontrolní výpočet maximální síly	38
4.5.2 Kontrolní výpočet deformace	38
5 Závěr, diskuze dosažených výsledků	40
6 Literatura	41
7 Seznam obrázků	42
8 Seznam tabulek	42

Seznam použitého značení a zkratk

Značka	Popis	Jednotka
a	minimální tloušťka stěny	mm
D	výchozí průměr trubky	mm
d	okamžitý průměr trubky	mm
d ₁	výchozí průměr	mm
d ₂	okamžitý průměr	mm
F	síla v poslední fázi pochodu zužování	N
F'	síla ve druhé fázi pochodu zužování	N
F _{max}	maximální síla	N
F _{max-PP}	maximální síla při plném přechování	MN
F _{max-RZ}	maximální síla při rotačním zakružování	MN
M _k	krouticí moment u rotačního zakružování	Nm
MT	magnetický test	
n	technologický součinitel bezpečnosti	1
P _h	zkušební přetlak při hydraulické zkoušce	bar
P _{RZ}	výkon přepočítaný pro rotační zakružování	MW
R	poloměr oblouku obrysu tažnice	mm
Re	mez kluzu	MPa
R _m	mez pevnosti v tahu	MPa
r _m	poloměr zaoblení hrany	mm
S	okamžitá plocha příčného průřezu	mm ²
S ⁰	výchozí plocha příčného průřezu	mm ²
s	okamžitá tloušťka stěny	mm
s ⁰	výchozí tloušťka stěny	mm
γ	úhel sklonu tvořící čáry kužele	°
λ	součinitel plnosti diagramu	1
η	součinitel účinnosti	1
ρ	poloměr oblouku AB	mm
ρ _A	poloměr volného zakřivení	mm
σ ₁	obvodové tlakové napětí	MPa
σ ₂	meridiánové tlakové napětí	MPa
σ _k	mez kluzu materiálu	MPa
σ _k ⁰	počáteční mez kluzu materiálu	MPa
φ ₁ , φ ₂ , φ ₃	složky deformace	1
φ _i celk	celková intenzita deformace	1

1 Úvod

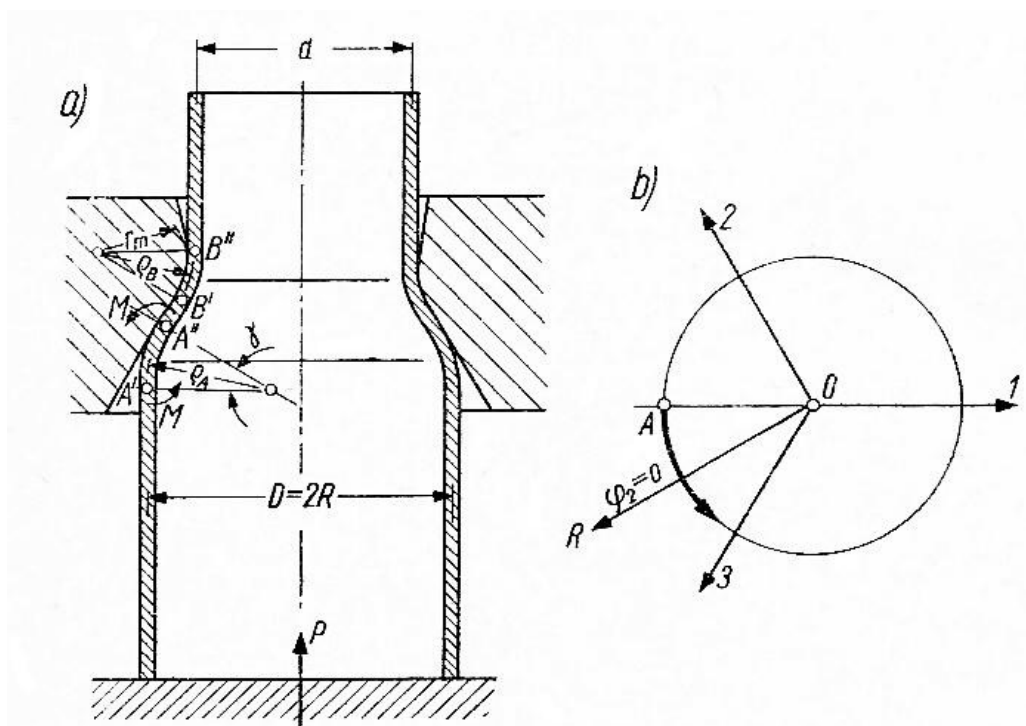
Bakalářská práce se zabývá analýzou rotačního tváření rotačních skořepin. Samotné tváření je proces, při kterém působením vnějších sil nástroje na tvářený polotovaru dochází k překročení meze kluzu a tím k trvalé změně tvaru polotovaru. Použití technologie tváření je výhodné zejména ve velkosériové a hromadné výrobě, protože se vyznačuje vysokou produktivitou a hospodárností. Při tváření vzniká mnohem méně odpadu, nežli u obrábění. Neméně důležité je, že tvářené součásti mají oproti třískově obráběným nebo odlévaným součástem lepší mechanické a metalurgické vlastnosti a jsou celkově spolehlivější. Mají zvýšenou mez únavy, nepřerušný průběh vláken a mohou být zpevněny. Tváření se dělí na tváření za tepla a za studena. V našem případě se jedná o tváření za tepla.

Konkrétně se jedná o rotační uzavírání hrdel ocelových tlakových lahví o průměru 360mm, rychlostí přísuvu 250 mm/min. Při tomto procesu, vyvinutému technologií společnosti Vítkovice Cylinders, je excentricky umístěná tvárnice roztočena a po odpojení pohonu přisouvána proti rotujícímu, indukčně ohřátému polotovaru. Tato technologie umožňuje tváření s použitím mnohem menších sil, než plné nerotační pěchování, protože tvářecí síla působí vždy pouze na část obvodu tvarovaného polotovaru a deformace je tedy lokalizována do malé části jeho objemu. K simulaci tvářecího procesu je použit program Qform, který pracuje na principu metody konečných prvků. Z něj získáme veškeré potřebné hodnoty ve formě tabulek a grafických výstupů. Pro kontrolu správnosti výsledků z programu QForm bude následně proveden výpočet maximální síly a deformace analyticky – membránovou metodou.

Cílem práce je získání a následná analýza všech potřebných parametrů procesu rotačního tváření rotačních skořepin, což jsou: maximální síla, maximální kroutící moment, maximální výkon, teplota a deformace, které budou následně využity k návrhu nového kovacího stroje pro výrobu tlakových lahví větších rozměrů.

2 Rozbor technologií rotačního tváření rotačních skořepin

Technologie rotačního tváření rotačních skořepin je založena na principu stacionárního zužování trubky. U zužování (obr. 1a) dochází působením obvodových tlakových napětí σ_1 a meridiánových tlakových napětí σ_2 ke zmenšování průměru válcového elementu trubky. Určujícím schématem deformace daného pochodu je $\varphi_2 = 0$, $-\varphi_1 = \varphi_3$, což znázorňuje přímka OR v diagramu deformací (obr. 1b). [1]



Obrázek 1 – Stacionární pochod zužování trubky [1]

U tohoto diagramu je zásadním předpokladem zanedbání změn délky tvořící čáry. Při prvním aproximování předpokládáme kompenzaci zmenšení průměru jen určitým vzrůstem tloušťky stěny při konstantní délce poledníku. Z toho plyne platnost vztahů:

$$s = s^0 \cdot \frac{D}{d} \quad (1)$$

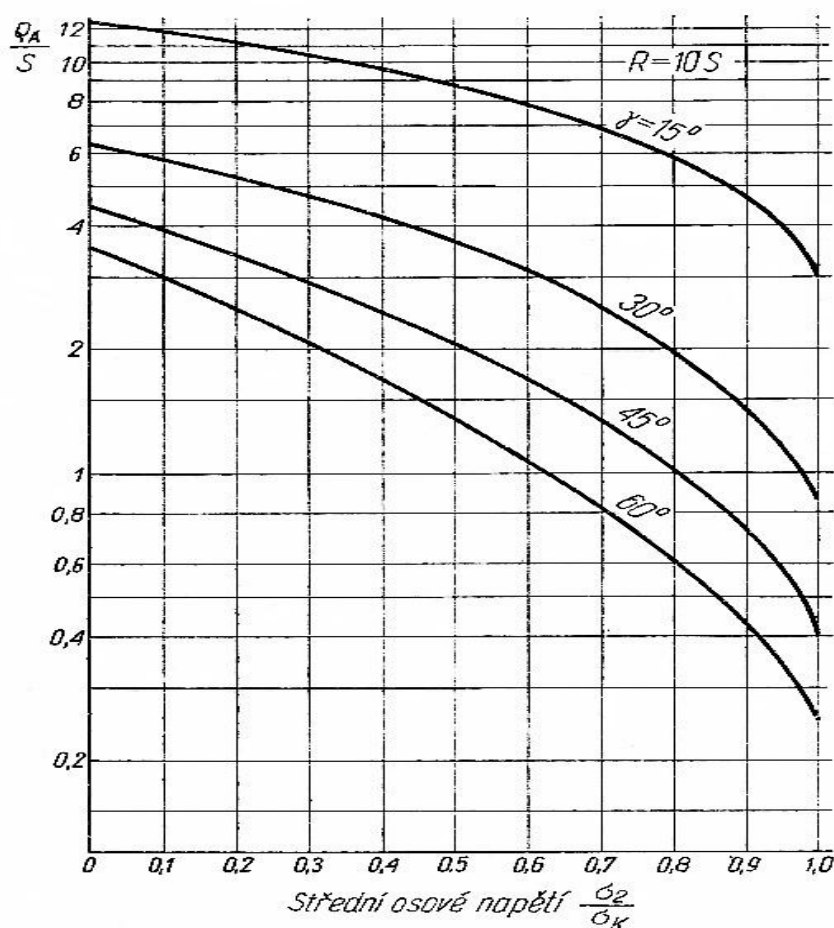
$$S = S^0 \quad (2)$$

2.1 Zužování trubek v kuželové tažnici [1]

Zde si rozebereme pochod stacionárního tažení trubky zužujícím se kuželovým otvorem pevné tažnice na obrázku 1a, kde označíme úhel sklonu tvořící čáry kužele symbolem γ a poloměr zaoblení hrany symbolem r_m .

K určení celkové intenzity deformace je nutné určit poloměr ρ_A volného zakřivení materiálu při vstupu do kuželové části tažnice.

Hodnotu vztahu ρ_A/s lze po předběžném odhadu napětí σ_2 ve stlačované části trubky určit z obrázku 2.



Obrázek 2 – Závislost středního osového napětí na ρ_A/s [1]

Hodnotu intenzity deformace materiálu získáme ze vztahu:

$$\varphi_{icelk} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{D}{d} + \frac{s}{2 \cdot r_m + s} + \frac{s}{2 \cdot \rho_A} \right) \quad (3)$$

Sílu F potřebnou k protlačení trubky tažidlem (u vyžíhaného výchozího materiálu) dostaneme ze vztahu:

$$F = \pi \cdot D \cdot s \cdot \frac{\lambda}{\eta} \cdot \sigma_k \cdot \varphi_{icelk} \quad (4)$$

Pro osově napětí stlačované trubky pak platí:

$$\sigma_2 = \frac{\lambda}{\eta} \cdot \sigma_k \cdot \varphi_{icelk} \quad (5)$$

Hodnotu součinitele účinnosti pochodu η zjistíme pro daný tvar tažnice z obrázku 3.

<i>Tvar obrysu nástroje</i>	<i>Obecný vzorec</i>	<i>Hodnota</i>
a)	$\eta = 1 - \frac{f}{\sin \gamma + f \cos \gamma}$	je-li: $f = 0,15$ $\gamma = 30^\circ$ $\eta = 0,76$
b)	$\eta = 1 - \frac{f \alpha}{1 - \cos \alpha + f \sin \alpha}$	je-li: $f = 0,15$ $\alpha = 60^\circ (\gamma = 30^\circ)$ $\eta = 0,75$
c)	$\eta = 1 - \frac{\pi}{2} \frac{f}{(1+f)}$	$f = 0,15$ $\eta = 0,8$
d)	$\eta = 1 - \frac{\pi}{2} f$	$f = 0,15$ $\eta = 0,76$

Obrázek 3 – Účinnost stacionárních lisovacích pochodů při různých tvarech nástroje [1]

Napětí σ_2 musí být menší než počáteční mez kluzu materiálu σ_k^0 , jinak by mohlo dojít ke zborcení trubky před vstupem do tažidla. S přihlédnutím na součinitel bezpečnosti technologického pochodu η má tato podmínka tvar:

$$\eta \cdot \sigma_2 < \sigma_k^0 \quad (6)$$

Když tento výraz dosadíme do vztahu (5) za σ_2 získáme podmínku omezující deformaci $\varphi_{i\text{ celk}}$. Té dosáhneme během jedné operace zužování:

$$\varphi_{i\text{ celk}} < \frac{\eta}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{\sigma_k^0}{\sigma_k} \quad (7)$$

kde n je technologický součinitel bezpečnosti.

Při zužování síla působí na nezpevněnou část trubky oproti tažení se zužováním a rozšiřováním, kde síla působí na již zpevněný materiál. Proto je přípustná deformace materiálu u zužování menší než u tažení se zužováním a rozšiřováním, což vyplývá ze vztahu (7). U zužování je nežádoucí nárůst meze kluzu, který je naopak u procesu tažení se zužováním příznivý.

Z tohoto plyne výhodnost použití již částečně zpevněného materiálu u operace zužování, protože další zpevnění probíhá pomaleji než u žíhaného materiálu. Pokud zužujeme trubky malých rozměrů, je nutné počítat s možností pružného vybočení tvářené části trubky.

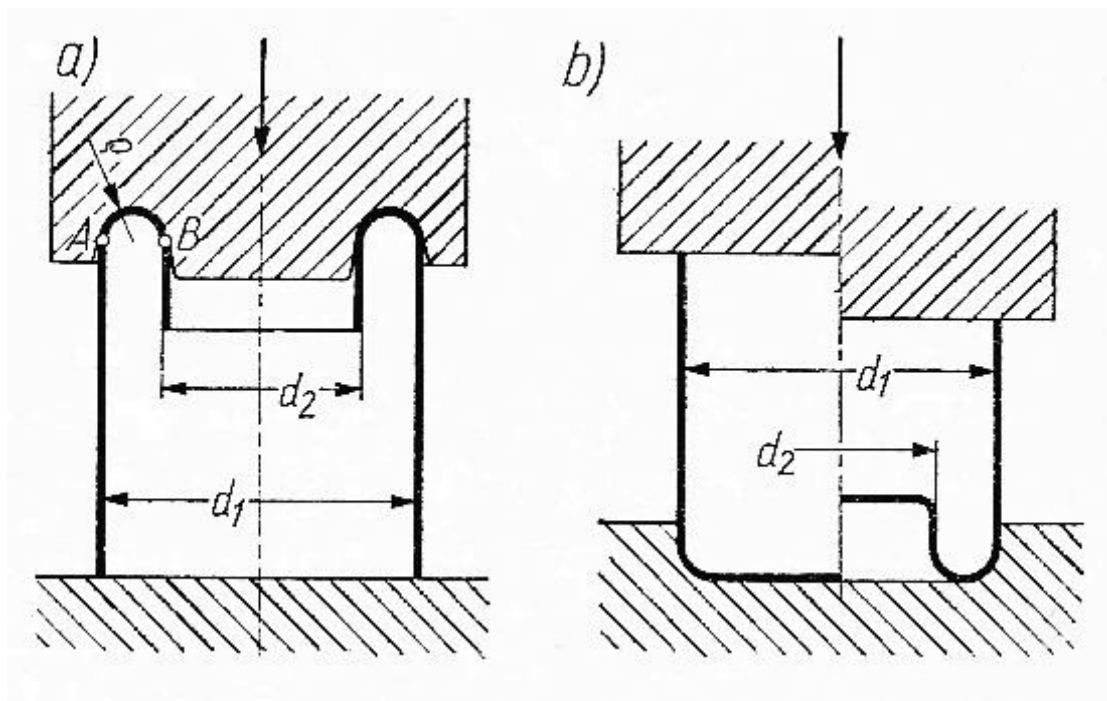
2.2 Zužování přehrnováním (obracením) [1]

Tento proces je zobrazen na obrázku 4a. Ke změně zakřivení dochází v bodech A a B, deformační pásma leží podél oblouku AB, jehož poloměr je dán vztahem:

$$\rho = -\frac{1}{4} \cdot (d_1 - d_2) \quad (8)$$

Střední intenzitu deformace materiálu u této metody vyjadřuje vzorec:

$$\varphi_{i\text{ celk}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{2s}{d_1 - d_2} \right) \quad (9)$$

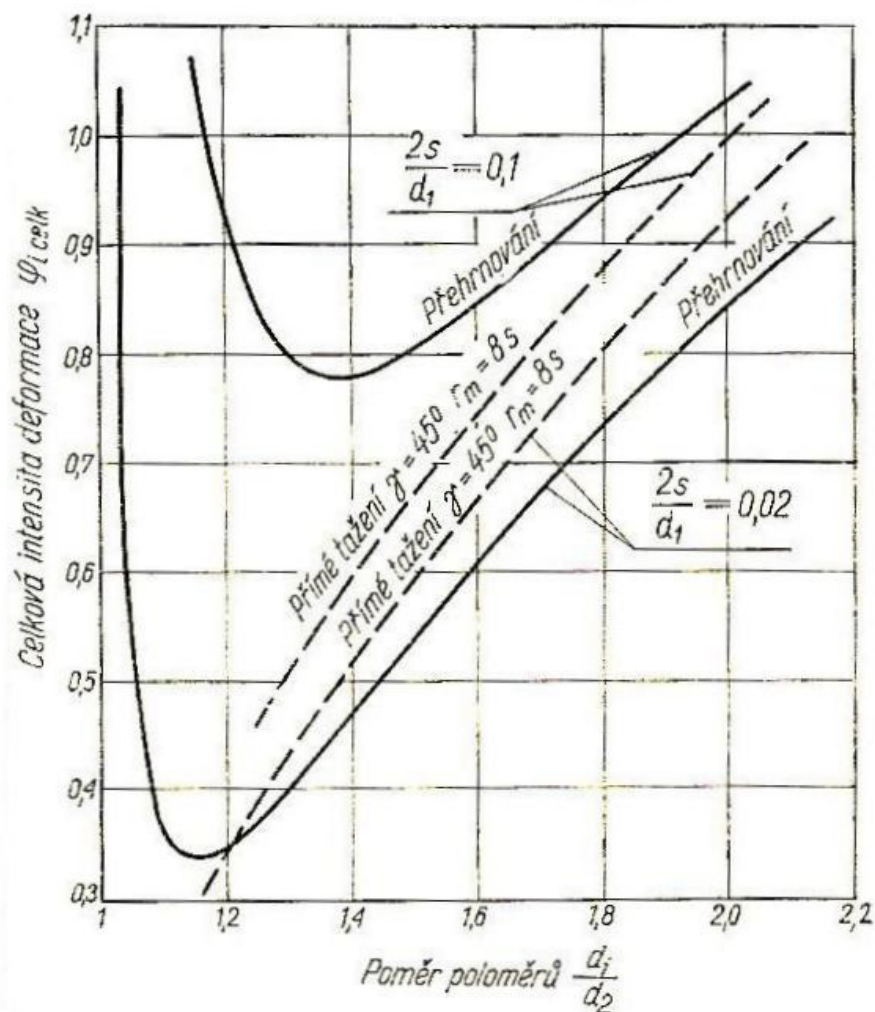


Obrázek 4 – a) zužování obruby b) zužování dna výtažku [1]

Z obrázku 5 je zřejmé, že intenzita deformace je přímo úměrná tloušťce stěny vzhledem k průměru nádoby. Při postupném zmenšování průměru d_2 za konstantní tloušťky plechu s a konstantního průměru d_1 se celková intenzita deformace napřed snižuje, až dosáhne minima, od kterého se začne zvyšovat. Síla zužování a deformace materiálu je minimální u průměru d_2 , protože ke změně válcového polotovaru dochází při volné deformaci, což je vidět na obrázku 4b.

Maximální stlačující sílu, jakou unesou válcové stěny výtažku opřené o dno jako na obrázku 4b, je síla příslušná tomuto průměru d_2 . Pokud tuto sílu překročíme, dojde k samovolnému obrácení stěny a zvednutí dna. Ke zjištění průměru d_2 je třeba derivaci výrazu v závorkách ze vztahu (9) podle d_2 položit rovnou nule.

$$\frac{d}{d(d_2)} \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{2s}{d_1 - d_2} \right) = 0 \quad (10)$$

Obrázek 5 – $\varphi_{i\text{ celk}}$ při přímém tažení a přehrnování [1]

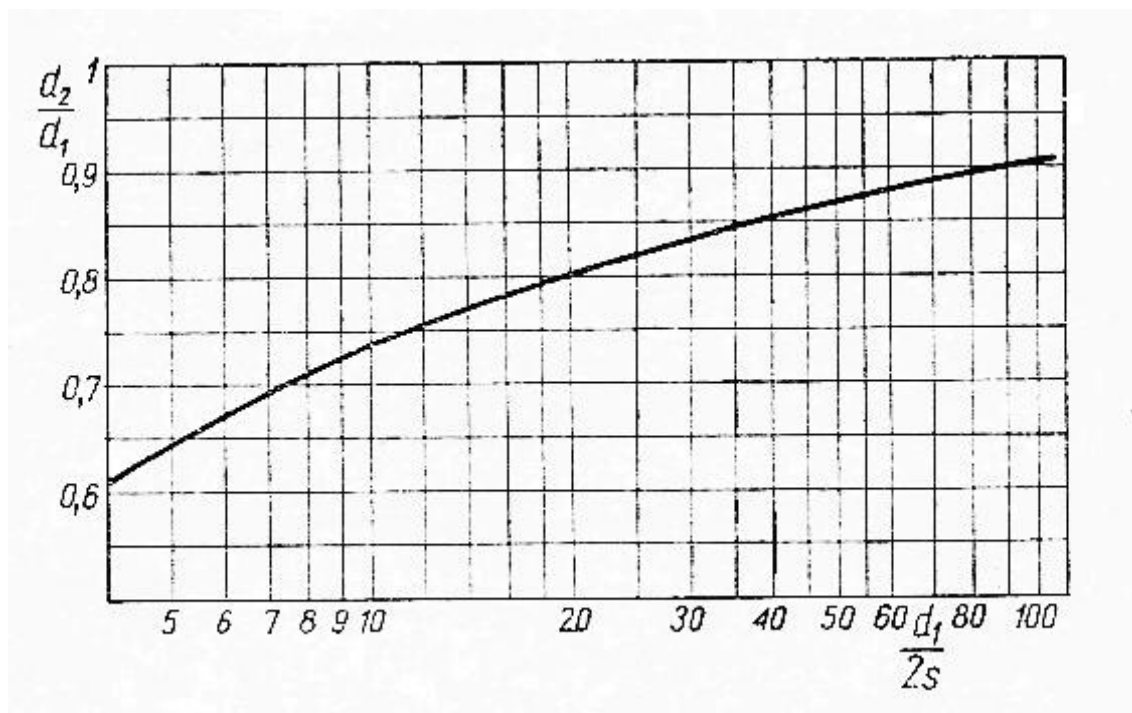
Dostáváme derivovaný a upravený vzorec:

$$\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 - 2 \cdot \left(1 + \frac{s}{d_1}\right) \left(\frac{d_2}{d_1}\right) + 1 = 0 \quad (11)$$

Z této rovnice můžeme vyjádřit vztah d_1/d_2 :

$$\frac{d_2}{d_1} = 1 + \frac{s}{d_1} - \sqrt{\left(1 + \frac{s}{d_1}\right)^2 - 1} \quad (12)$$

Závislost průměru d_1 na průměru d_2 je zobrazena na obrázku 6.

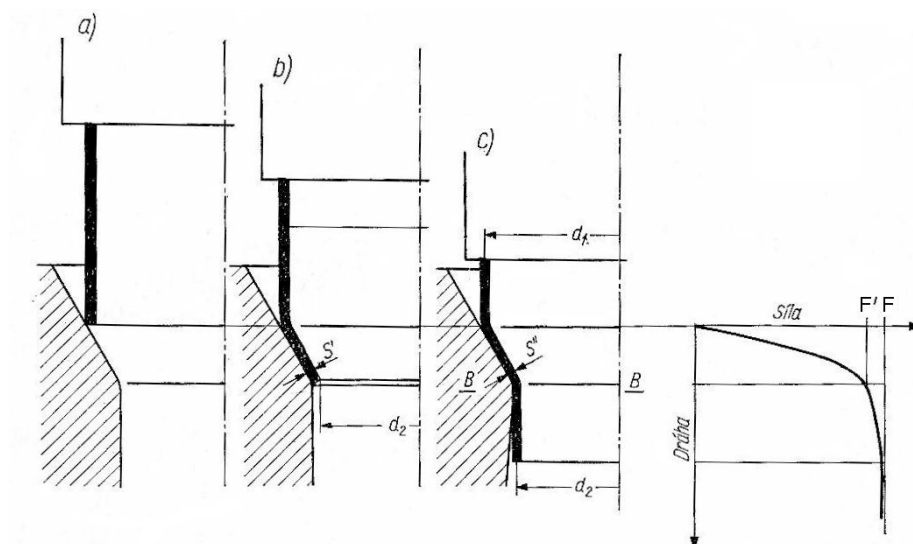
Obrázek 6 – Závislost poměrů $d_1/2s$ na d_2/d_1 [1]

Minimální hodnotu intenzity deformace $\varphi_{i\text{ celk}}$ nyní získáme dosazením hodnoty d_2/d_1 do vztahu (14). Sílu F' , která odpovídá velikosti dané deformace, určíme ze vztahu (13), kde hodnoty λ a σ_K získáme z diagramu zpevnění daného materiálu.

$$F' = \pi \cdot d_1 \cdot s \frac{\lambda}{\eta} \cdot \sigma_K \cdot \varphi_{i\text{ celk}} \quad (13)$$

2.3 Uzavírání konců trubek (zužováním) [1]

Tyto procesy patří mezi nestacionární pochody, které můžeme považovat za určité počáteční stadium stacionárních procesů. K přibližnému rozboru některých nestacionárních procesů lze použít energetické metody rozboru stacionárních pochodů. Počáteční stadia zužování trubek v tažnici s kuželovým otvorem jsou zobrazeny na obrázku 7, který si nyní popíšeme.



Obrázek 7 – Výchozí fáze stacionárního pochodu zužování [1]

2.3.1 Operace se dělí na tři fáze:

a) V první fázi se okraj trubky tlačené k tažnici ohýbá směrem do středu.

b) Ve druhé fázi se materiál posunuje po kuželové části tažnice, při čemž se zmenšuje průměr konce trubky. Na konec trubky během tohoto pochodu působí pouze tlakové obvodové napětí σ_1 . Deformaci konce trubky vyvolává napjatost podle schématu $\varphi_1 = 2\varphi_2 = \varphi_3$. V místě průměru odpovídajícímu průměru d_2 je tloušťka materiálu definována vztahem:

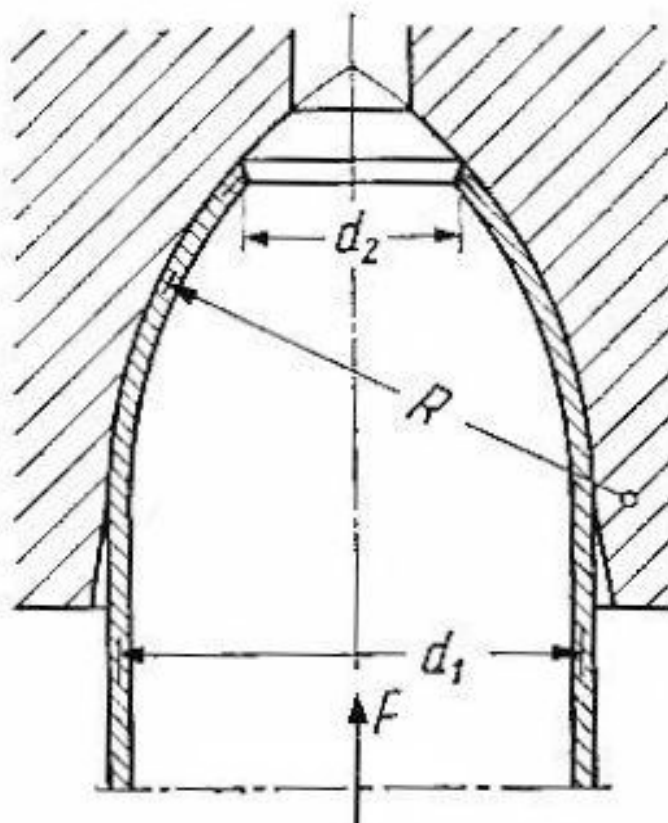
$$s' = s^0 \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \quad (14)$$

Síla pro tuto fázi je označena v diagramu na obrázku 7 symbolem F' .

c) Ve třetí fázi se na konci trubky začíná tvořit válcová část o průměru d_2 (obrázek 7c). Od průřezu $B-B$ dále povolna přestává vzrůstat mez kluzu a tloušťka materiálu až dojde k úplné stabilizaci pochodu. Tloušťka stěny trubky pak bude odpovídat výrazu:

$$s \approx s^0 \cdot \frac{d_1}{d_2} \quad (15)$$

Dále dojde k ustálení protlačovací síly na úroveň dříve určené síly F . Při částečném uzavírání je síla F' jen nepatrně menší než síla plné stabilizace procesu F . Proto je u metody energetické bilance možné výslednou sílu F považovat za horní mez síly F' potřebné ke zmenšení průměru konce trubky na rozměr d_2 . Chyba, ke které u výpočtu dochází, zvyšuje bezpečnost pochodu.



Obrázek 8 – Uzavírání konce trubky tažnicí [1]

Na obrázku 8 je vidět příklad metody uzavírání konce trubky tažnicí. Její obrys je tvořen kruhovým obloukem o poloměru R . Za předpokladu, že část procesu je ve stacionárním stavu, lze stanovit hledanou sílu z následujících rovnic:

$$\varphi_{i\text{ celk}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{s}{4 \cdot R} \right) \quad (16)$$

$$F = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot \frac{\lambda}{\eta} \cdot \sigma_k \cdot \varphi_{i\text{ celk}} \quad (17)$$

Maximální síla, omezována nebezpečím deformace stlačovaného úseku trubky, je dána vztahem:

$$F_{\max} = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot \sigma_k^0 \quad (18)$$

Maximální deformaci dosažitelnou v tomto pochodu pak stanovíme ze vztahu (7).

2.4 Technické požadavky na tlakové nádoby pro přepravu plynů

Za tlakové nádoby pro přepravu plynů jsou považovány přenosné tlakové nádoby, ve kterých může být přetlak větší než 0,05 MPa. [2]

Rozlišujeme tři základní druhy tlakových nádob:

- a) svařované ocelové lahve z nelegované oceli, vyráběné z několika částí o efektivní tloušťce stěny 5mm nebo menší, jejichž přetlak nesmí překročit 6 MPa
- b) bezešvé ocelové lahve vyráběné z jednoho kusu materiálu
- c) bezešvé lahve z nelegovaného hliníku a slitin hliníku vyráběné z jednoho kusu materiálu

2.4.1 Použité oceli a jejich chemické složení

Musí být použita uklidněná ocel, odolná vůči stárnutí. Hotová láhev musí být podrobena tepelnému zpracování, což může být normalizační žíhání následované popouštěním, nebo kalení a popouštění. Obsahy fosforu a síry v tavbě nesmí překročit 0,035 %, v součtu pak nesmí překročit 0,06 %. Obsah legur v oceli musí být udán s dostatečnou přesností, dovolené rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami pro každou tavbu udává tabulka 1. [2]

Tabulka 1 – Dovolené rozsahy mezi max. a min. obsahem legur v tavbě [2]

C	0,06% , je-li maximální obsah menší než 0,3% 0,07% , je-li maximální obsah 0,3% nebo více
Mn, Si	0,30%
Cr	0,30% , je-li maximální obsah menší než 1,5% 0,50% , je-li maximální obsah 1,5% nebo více
Ni	0,40%
Mo	0,15%
V	0,10%

2.4.2 Konstrukce a jakost provedení

Vnitřní a vnější povrch nesmí vykazovat vady, které by mohly snížit provozní bezpečnost lahve. Rozdíl mezi největším a nejmenším průměrem nesmí být větší než 1,5 % střední hodnoty těchto dvou průměrů. Maximální odchylka válcové části od přímky nesmí překročit 3 mm na 1 m délky. Patní kroužky (pokud jsou použity) musí být dostatečně pevné, musí zajistit dostatečnou stabilitu lahve a nesmějí umožnit hromadění vody. [2]

2.4.3 Výpočet nejmenší tloušťky stěny [2]

Nejmenší tloušťka stěny nesmí být menší než maximální hodnota získaná z těchto vzorců:

$$a = 1,5 \text{ [mm]} \quad (19)$$

$$a = \frac{D}{250} + 1 \text{ [mm]} \quad (20)$$

$$a = \frac{Ph \cdot D}{\frac{20 \cdot R}{\frac{4}{3}} + Ph} \text{ [mm]} \quad (21)$$

kde:

Ph – zkušební přetlak při hydraulické zkoušce [bar]

D – jmenovitý vnější průměr lahve [mm]

R – je nižší hodnota z:

1) Re

2) $0,75 Rm$ – pro normalizačně žíhané nebo žíhané a popouštěné lahve

$0,85 Rm$ – pro kalené lahve

- Při kování dna z trubky musí být tloušťka stěny uprostřed dna nejméně 1,5 a.
- Tloušťka okraje dna, na kterém láhev stojí, musí být nejméně 2 a.
- Pro dosažení optimálního rozdělení napětí je nutné, aby se tloušťka stěny lahve v oblasti přechodu mezi válcovou částí a dnem měnila postupně.

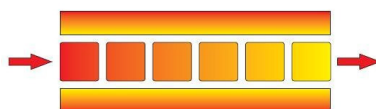
2.4.4 Výroba ocelových tlakových nádob na plyny [3], [4]

V současné době se bezešvé tlakové lahve vyrábějí dvěma technologiemi lišícími se vstupním polotovarem – tvářením z trubek a zpětným protlačováním ze sochoru. K uzavření polotovaru a tvorbě hrdla se používá technologie rotačního tváření, která je objektem zkoumání této práce.

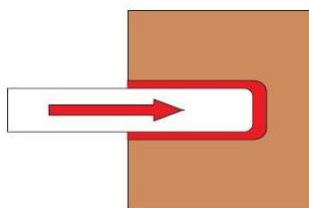
Zde uvedu jednotlivé operace, ze kterých se skládá výroba tlakových lahví zpětným protlačováním na lince ve Vítkovicích (otevřené v roce 2008):

- Skladování materiálu
- Dělení materiálu

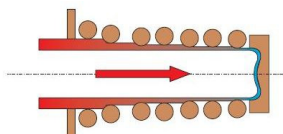
- Indukční ohřev materiálu



- Zpětné protlačování



- Protahování



- Ultrazvuková kontrola polotovaru

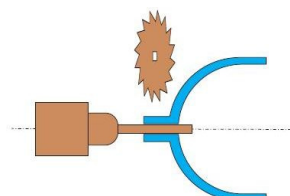
- Zarovnání polotovaru



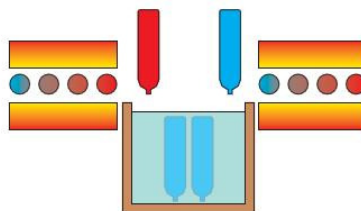
- Tváření hrdla



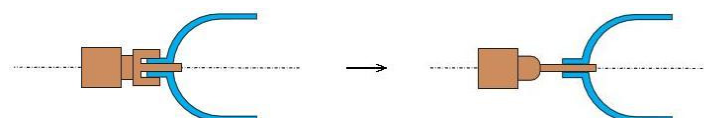
- Zarovnání a předvrtání otvoru v hrdle



- Tepelné zpracování

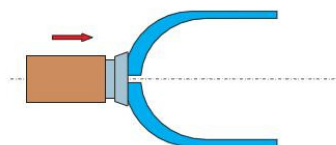


- Tryskání vnějšího povrchu lahví
- Popisování (značení)
- Kontrola tvrdosti
- Opracování hrdla a řezání závitu

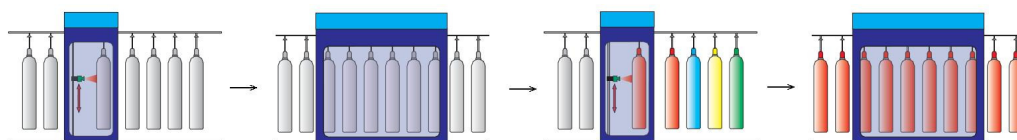


- Kontrola závitu a hrdla
- Kontrola opracovaných ploch hrdla pomocí MT
- Čištění vnitřního povrchu lahví
- Měření objemu
- Hydraulická zkouška
- Sušení lahví
- Kontrola hrdel vířivými proudy

- Zalisování hrdlového kroužku



- Vážení a značení
- Tryskání vnitřního povrchu lahví
- Parní čištění
- Ultrazvuková kontrola lahví
- Tryskání vnějšího povrchu lahví
- Komplexní kontrola lahví
- Základní antikoroziční nátěr – sušení lahví – vrchní nátěr sušení lahví

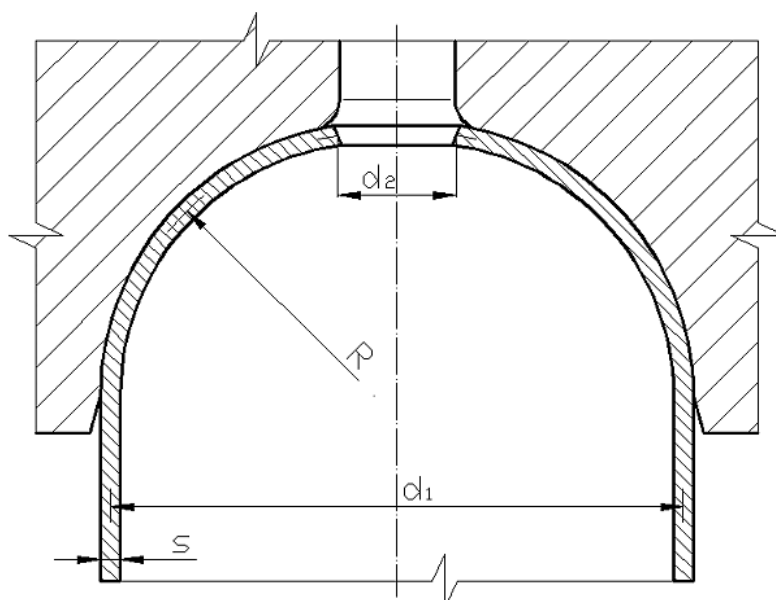


- Barevné značení
- Montáž příslušenství
- Výstupní kontrola, balení lahví, expedice

3 Metody predikce tvářecích parametrů tváření hrdel tlakových lahví

3.1 Analytická metoda (membránová teorie) [1]

Analytická metoda je jinak nazývaná také klasickou nebo početní metodou. Pro náš případ tváření hrdel tlakových se využívá tvářecí operace zužování (uzavírání) konce trubky. Uzavírání je v tomto případě prováděno po kruhovém oblouku o poloměru R , jak je vidět na obrázku 9.



Obrázek 9 – Uzavírání konce trubky

V této práci je analytický výpočet použit jako kontrola správnosti hodnot získaných pomocí programu QForm (verze 4.3.2), který pracuje na principu metody konečných prvků. Pokud předpokládáme, že je tvářecí proces částečně stacionární, lze celkovou intenzitu deformace a maximální sílu stanovit z následujících dvou vztahů:

$$\varphi_{\text{celk}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{s}{4 \cdot R} \right) \quad (22)$$

$$F_{\text{max}} = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot \sigma_k \quad (23)$$

Kde je:

d_1 – střední počáteční průměr trubky	[mm]
d_2 – střední konečný průměr trubky	[mm]
s – tloušťka zužované trubky	[mm]
R – poloměr oblouku zužování	[mm]
σ_k – mez kluzu	[MPa]

3.2 Metoda konečných prvků (MKP) [5]

V současnosti nejpoužívanější metodou v oblasti řešení napěťově-deformačních úloh je metoda konečných prvků (MKP) – anglicky Finite Element Method (FEM).

MKP umožňuje řešení problémů klasickými metodami buď neřešitelných, nebo řešitelných jen velmi pracně. Tato metoda k řešení úloh využívá rozsáhlých soustav jednoduchých (lineárních) rovnic tak, aby bylo možno výpočty efektivně provádět pomocí výpočetní techniky.

MKP byla poprvé popsána roku 1941 Richardem Courantem, který dělil oblast na konečný počet trojúhelníkových prvků. Řešení na počítačích bylo umožněno na počátku 50. let 20. století.

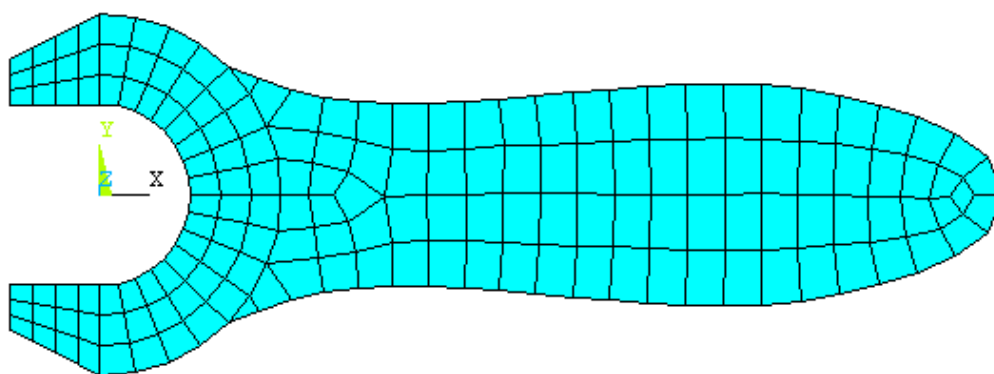
V dnešní době metoda konečných prvků nachází uplatnění v mnoha oblastech, zpravidla ve strojním inženýrství. Na trhu je v současnosti široký výběr softwarových produktů velkého rozsahu možností řešení i cen.

MKP se dělí na tři základní fáze:

- Diskretizace
- Aproximace
- Interpolace

3.2.1 Diskretizace

Při diskretizaci je těleso rozděleno na množinu malých částí, které lze snadno matematicky popsat. Jednotlivé části nazýváme prvky nebo elementy. Rozlišuje se mezi rovinnými a prostorovými prvky podle typu úlohy. Rovinnými mohou být trojúhelníky, čtyřúhelníky a prostorovými čtyřstěny, krychle, kvádry atd. Hledané parametry úlohy jsou pak určovány v uzlových bodech sítě prvků. [6]

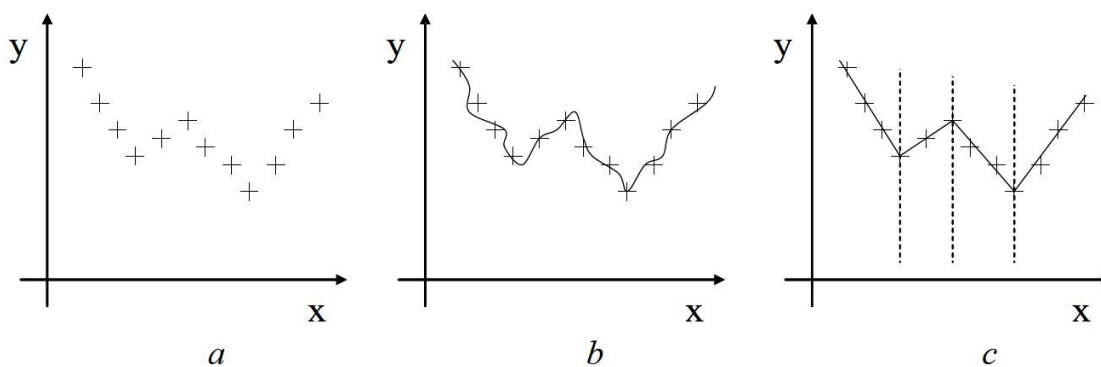


Obrázek 10 – Těleso rozdělené na síť konečných prvků [5]

3.2.2 Aproximační funkce [5],[6]

Aproximační funkcí, neboli funkcí prostorových souřadnic nahrazujeme fyzikální vlastnosti tělesa, teplotu, posunutí, napětí atd. V jednotlivých uzlech tělesa nahrazujeme neznámé funkce funkcí aproximační. Ta musí mít tolik členů, kolik má prvek uzlů. Například pro čtvercový prvek vznikne polynom čtvrtého stupně. S rostoucím počtem uzlů roste přesnost aproximační funkce i celkového výsledku analýzy. Pokud nemáme k dispozici matematiky přesný prvek, lze použít větší počet prvků, což ale zvyšuje nároky na výkon počítače.

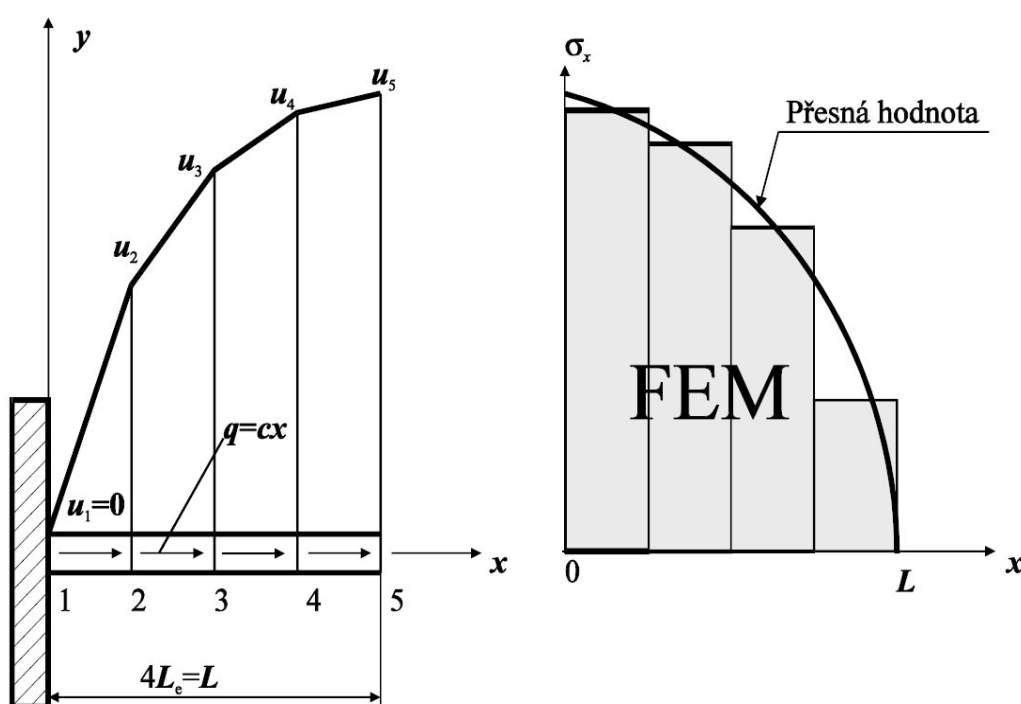
Na obrázku 11a máme funkci, kterou lze aproximovat polynomickeou funkcí vysokého řádu (obrázek 11b) nebo rozdělit měřený interval na několik částí a pro každou z nich použít lineární aproximaci (obrázek 11c).



Obrázek 11 – Příklad aproximace skupiny dat [5]

3.2.3 Interpolace

Interpolace je základem MKP. Slouží k získání přibližných hodnot bodů funkce na intervalu, ve kterém známe hodnoty jiných bodů dané funkce. Je založena na faktu, že malá část složité funkce může být nahrazena jednoduchou funkcí. Nejjednodušší je lineární interpolace, se kterou dosáhneme dostatečné přesnosti při dostatečném počtu prvků. Prvky kvadratické, kubické a vyšších řádů mohou poskytnout přesnější výsledek, ale výpočet bude mnohem náročnější.



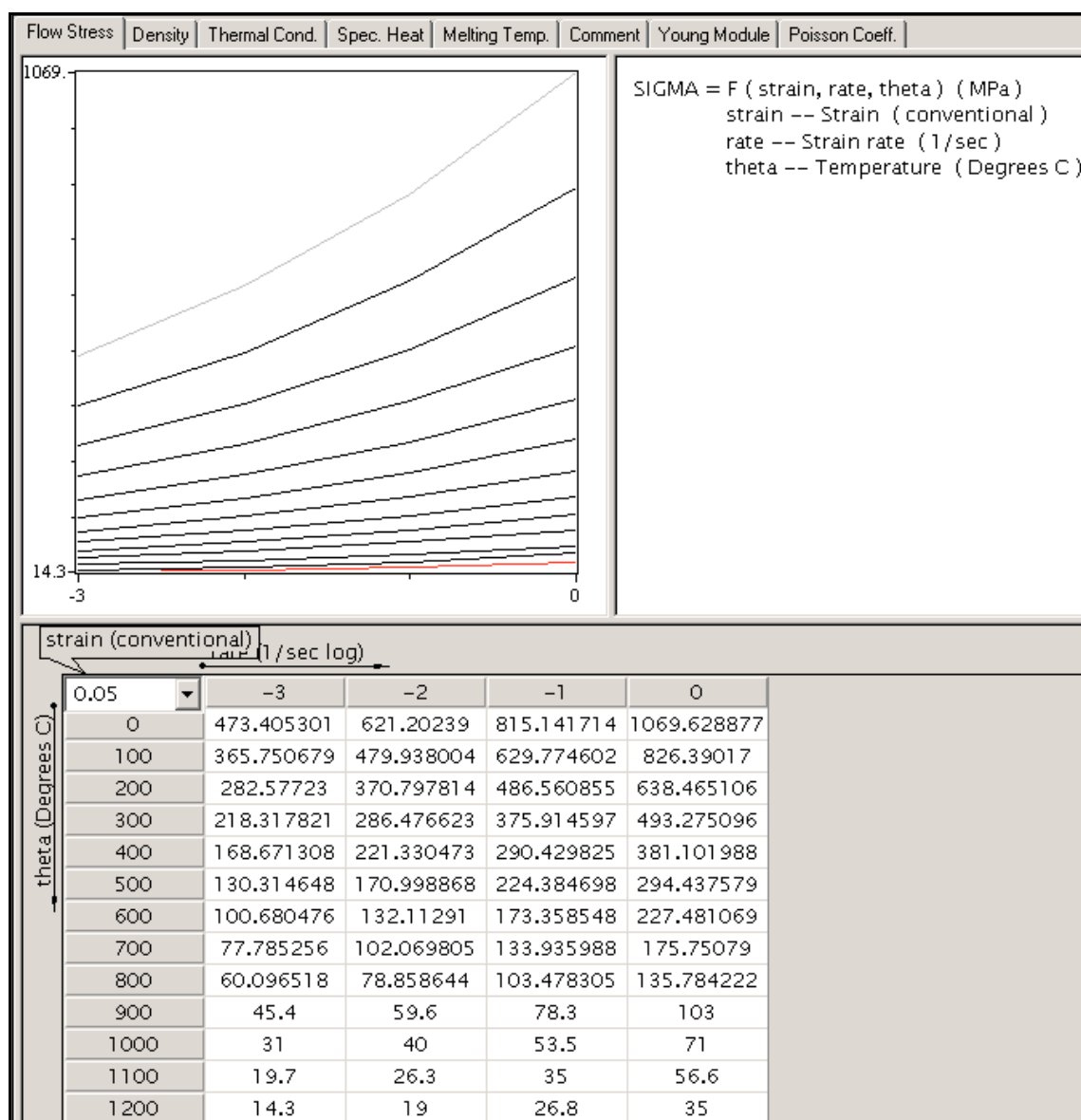
Obrázek 12 – Lineární interpolační pole [6]

4 Analýza tvářecích parametrů výroby hrdel tlakových lahví

4.1 Nastavení parametrů simulace v programu QForm – vstupní hodnoty

4.1.1 Materiál polotovaru

Materiálem polotovaru je nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel k zušlechťování. Na následujícím obrázku je vidět, jak je definována v programu QForm.



Obrázek 13 – Vlastnosti materiálu polotovaru v QFormu

4.1.2 Zadané vstupní hodnoty

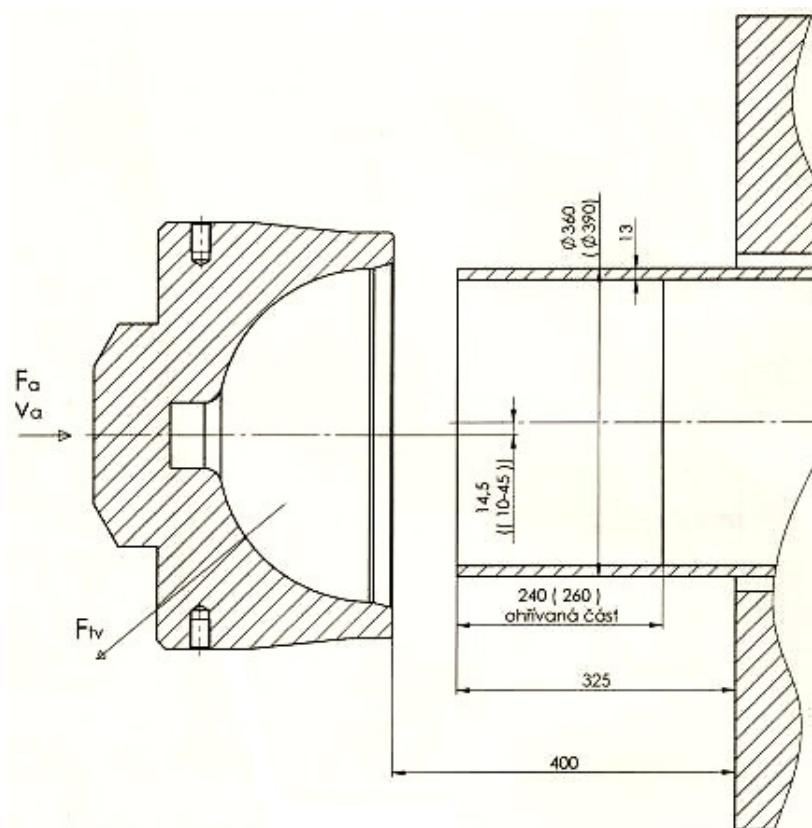
Počáteční nastavení simulace v programu QForm:

- rychlost přísuvu zápustky: 250 mm/s
- počáteční teplota zápustky: 200 °C
- počáteční teplota polotovaru: 1150 °C
- doba ochlazování na vzduchu a v zápustce: 5 + 5 s
- konečná vzdálenost nástrojů: 0 mm
- parametry kovacího stroje:

Název:	Kotrubčík 250
Jmenovitá rychlost:	250 mm/s
Maximální síla:	6,3 MN

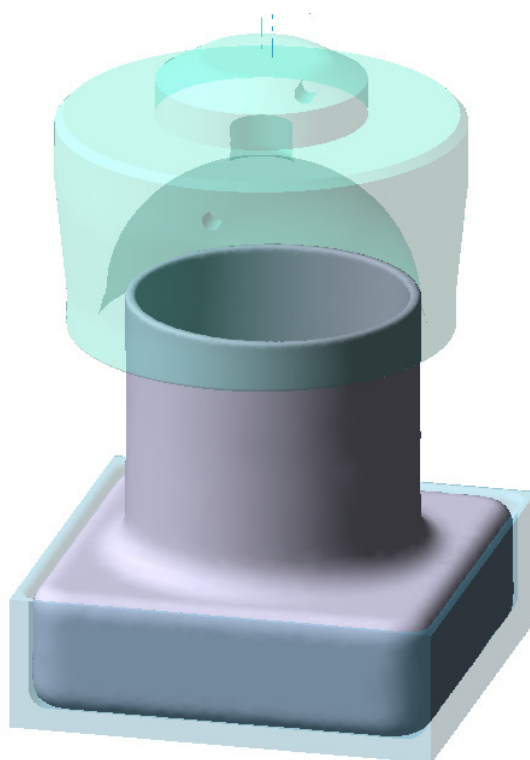
4.1.3 Modely zápustky a polotovaru

Modely byly vytvořeny podle poskytnuté výkresové dokumentace (obrázek 14).

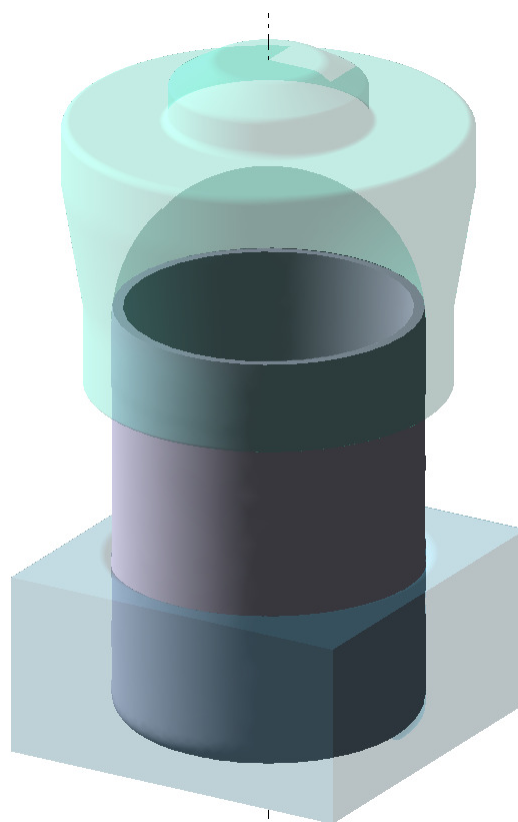


Obrázek 14 – Poskytnutý výkres sestavy tvarování hrdla

Na následujících obrázcích jsou vidět celé sestavy modelů v programu QForm pro rotační zakružování (obrázek 15) a plné přechování (obrázek 16).



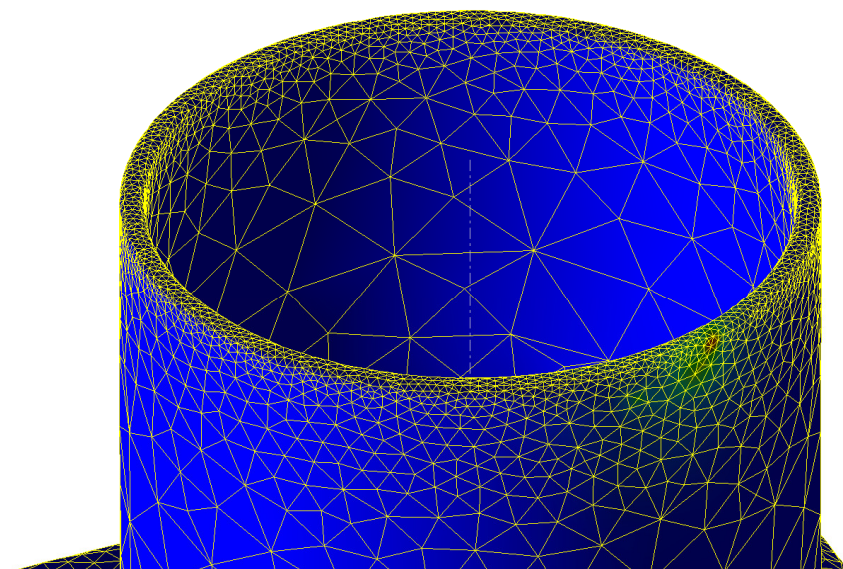
Obrázek 15 – Sestava pro rotační zakružování



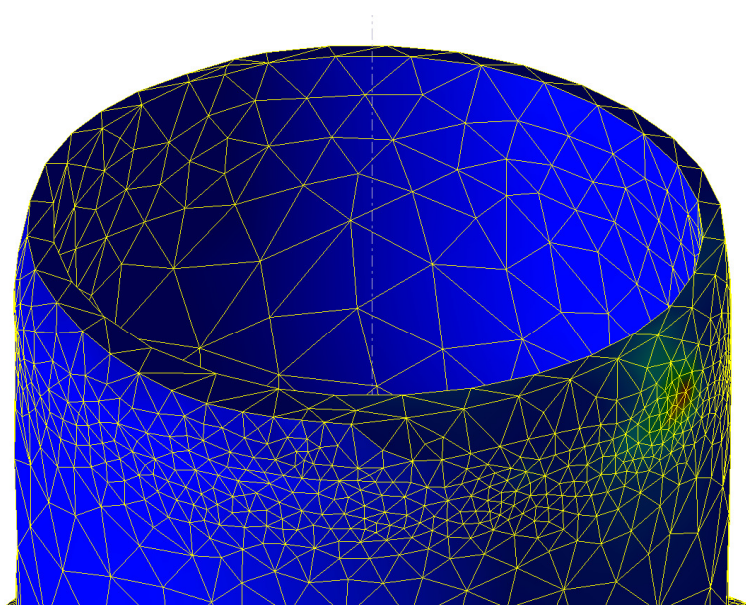
Obrázek 16 – Sestava pro plné přechování

4.2 Podmínky zpracování výstupních dat z programu Qform

Podle původního zadání měla být analýza tváření provedena jako proces rotačního zakružování. Tuto variantu však program QForm dané verze nebyl schopen dokončit. Simulace ve přibližně 12 procentech dokončení (asi 0,054 sekundy od začátku) zkolabovala, jelikož nedocházelo ke správnému rozložení prvků na hraně trubky. Velikost prvků se v kritické oblasti simulace neustále zvětšovala, čímž se vytvářela nereálná geometrie, jak je vidět na obrázku 18.



Obrázek 17 – Rozložení prvků na počátku simulace rotačního zakružování



Obrázek 18 – Rozložení prvků těsně před pádem simulace rotačního zakružování

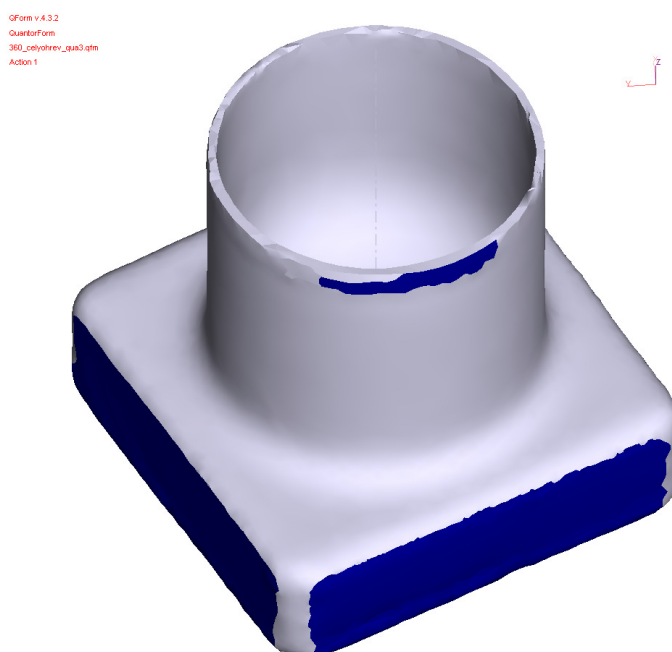
Z tohoto důvodu musela být provedena náhradní simulace, a to plné nerotační pēchování. Tato simulace byla provedena v režimu čtvrtinové symetrie z důvodu úspory výpočetního výkonu.

Poté jsem musel přepočítat hodnoty síly a výkonu pro rotační zakružování a dopočítat kroutící moment, jelikož ten se v nerotačním pēchování vůbec nevyskytuje. Přepočet hodnot z plného pēchování na rotační je založen na velikosti úhlu styku, což je popsáno v následující kapitole.

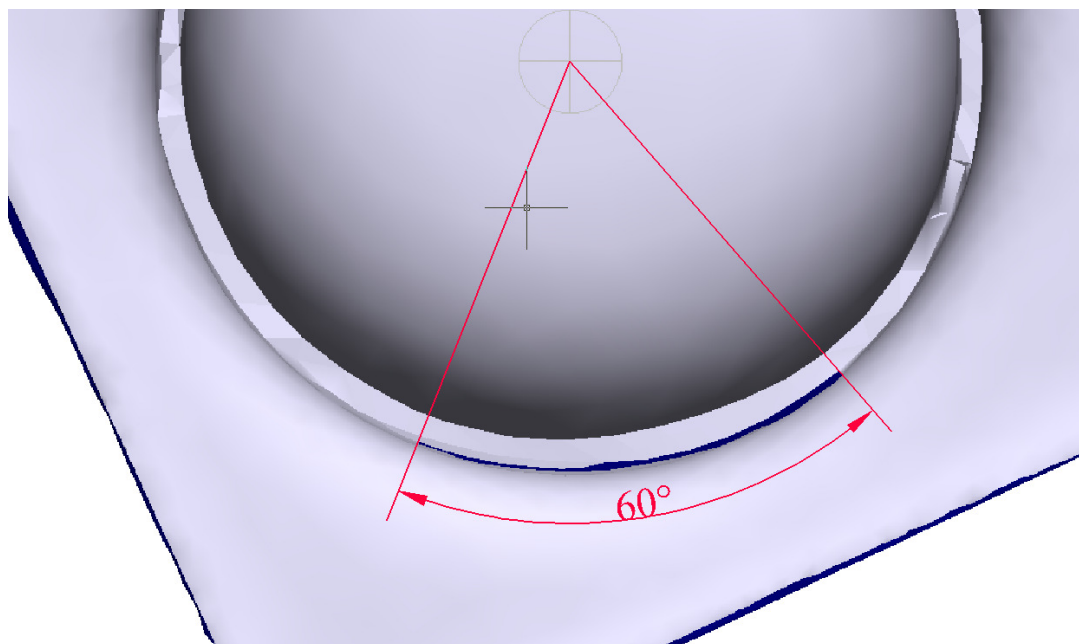
4.2.1 Stanovení úhlu styku

Velikost úhlu styku jsem určil z prvního kroku simulace rotačního zakružování, dokud geometrie polotovaru odpovídala skutečnosti. Plochy polotovaru, které se dotýkají tvářecích nástrojů, mají modrou barvu, jak je vidět na obrázku 19. Nás zajímá oblast dotyku mezi rotující zápusťou a polotovarem, která je na obrázku 19 viditelná u horního okraje polotovaru. Úhel dotyku jsem pak určil pomocí AutoCadu z půdorysného pohledu na polotovar (obrázek 20).

Velikost úhlu styku vyšla přibližně 60°. Podle toho je zřejmé, že při rotačním zakružování působí rotující zápusť pouze na 1/6 celkového průřezu. Hodnoty síly a výkonu pro rotační zakružování tedy získám tak, že jejich hodnoty získané ze simulace plného pēchování vynásobím 1/6.



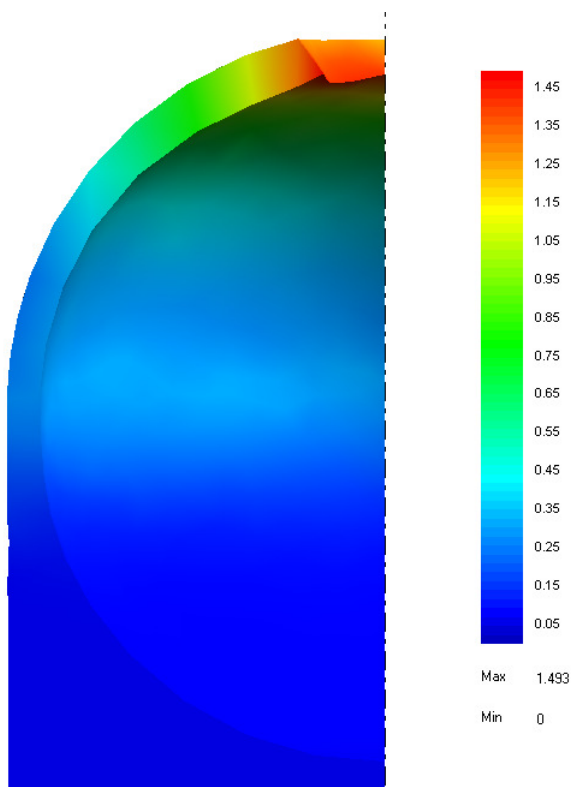
Obrázek 19 – Plochy dotyku nástrojů s polotovarem u rotačního tváření



Obrázek 20 – Určení úhlu styku rotující zápustky s polotovarem

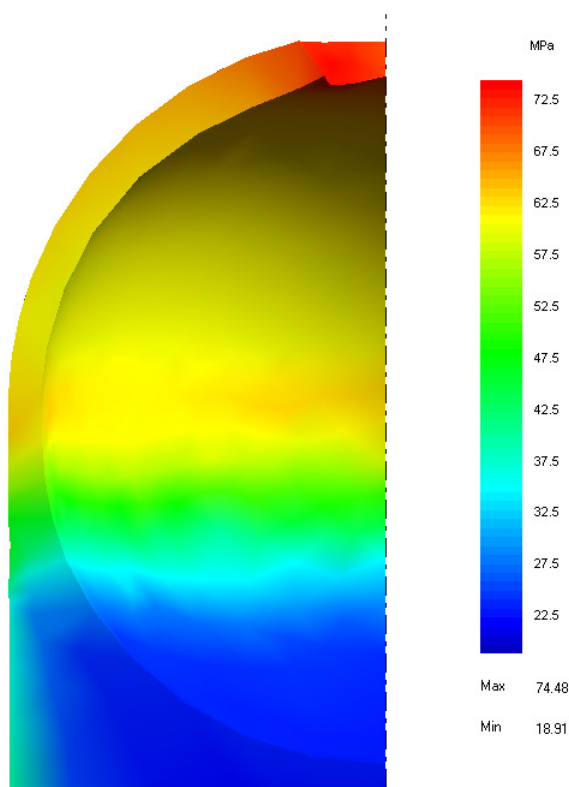
4.3 Tvářecí parametry získané ze simulace v programu QForm

Na obrázku 21 je zobrazeno rozložení efektivní deformace v řezu polotovarem.

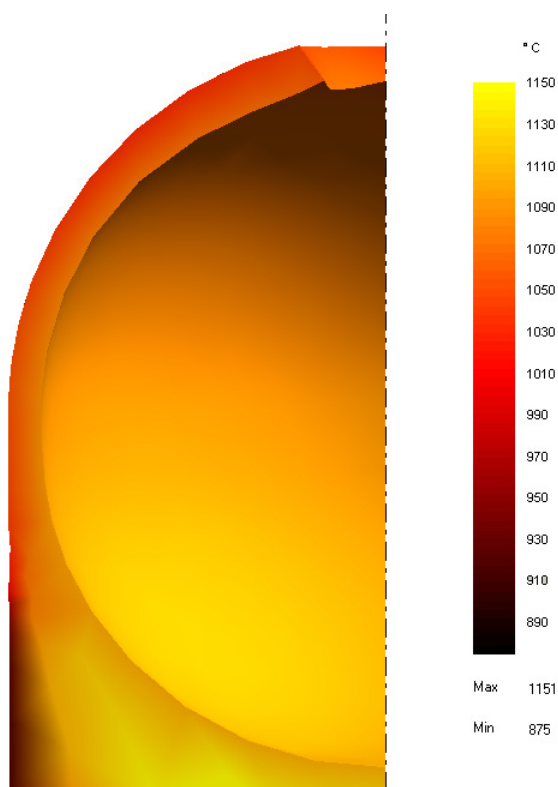


Obrázek 21 – Efektivní deformace

Obrázek 22 ukazuje rozložení „Flow stress“ v řezu polotovarem, obrázek 23 pak zobrazuje rozložení teploty.



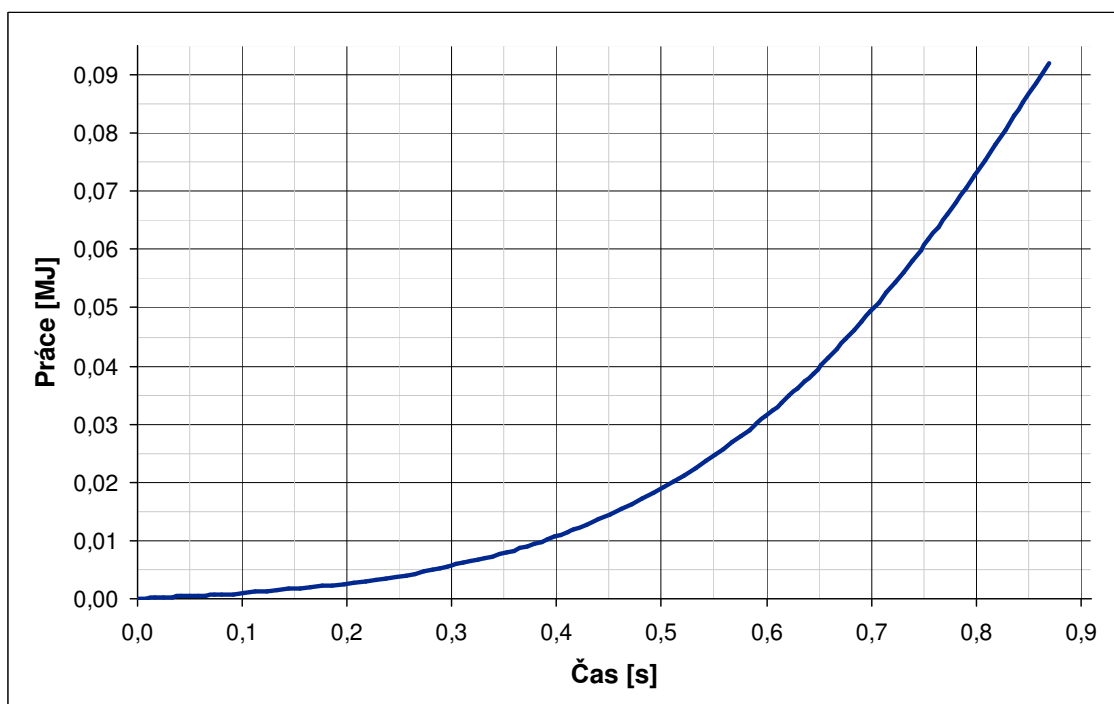
Obrázek 22 – Flow stress



Obrázek 23 – Teplota polotovaru

Tabulka 2 – Hodnoty práce v závislosti na čase

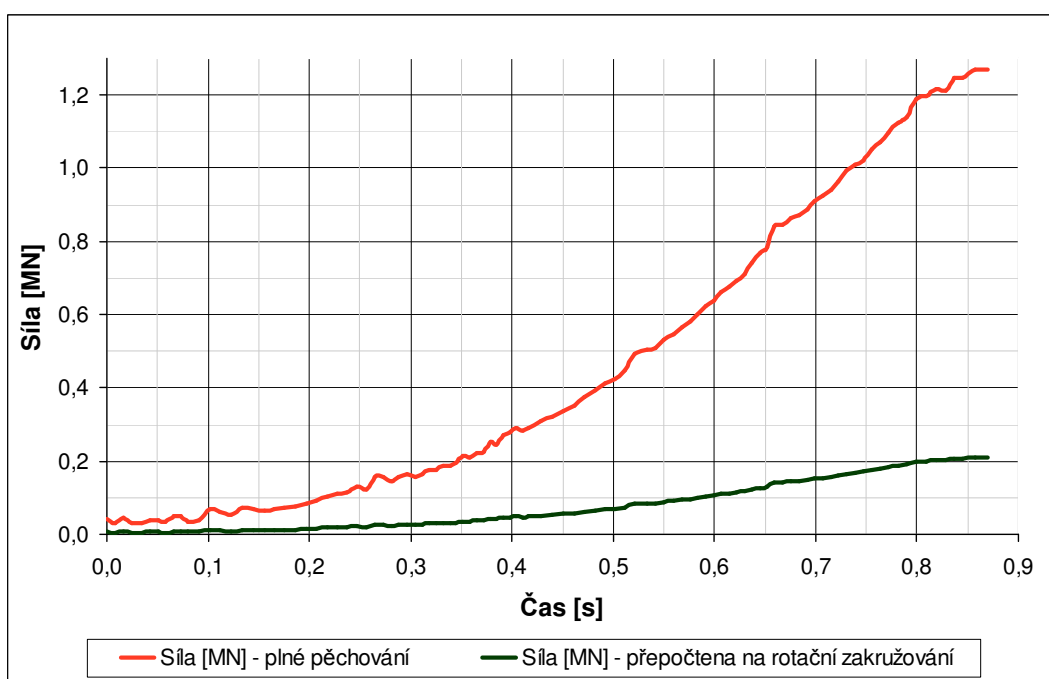
Čas [s]	Práce [MJ]
0,00	0,00000
0,03	0,00031
0,07	0,00059
0,10	0,00097
0,14	0,00164
0,19	0,00236
0,23	0,00327
0,26	0,00436
0,30	0,00557
0,32	0,00673
0,35	0,00799
0,38	0,00940
0,40	0,01106
0,44	0,01360
0,48	0,01717
0,52	0,02111
0,56	0,02574
0,59	0,03016
0,62	0,03489
0,65	0,04002
0,68	0,04612
0,71	0,05263
0,75	0,05991
0,78	0,06817
0,82	0,07792
0,86	0,08860



Obrázek 24 – Graf závislosti práce na čase

Tabulka 3 – Hodnoty síly pro přechování a zakružování

Čas [s]	Síla [MN] (přechování)	Síla [MN] (zakružování)
0,00	0,04307	0,00718
0,03	0,03121	0,00520
0,07	0,05090	0,00848
0,10	0,07053	0,01176
0,14	0,06934	0,01156
0,19	0,07826	0,01304
0,23	0,10913	0,01819
0,26	0,15790	0,02632
0,30	0,16364	0,02727
0,32	0,17653	0,02942
0,35	0,21300	0,03550
0,38	0,25393	0,04232
0,40	0,29167	0,04861
0,44	0,32073	0,05346
0,48	0,39454	0,06576
0,52	0,49447	0,08241
0,56	0,54567	0,09095
0,59	0,62265	0,10378
0,62	0,69029	0,11505
0,65	0,78487	0,13081
0,68	0,87291	0,14549
0,71	0,94225	0,15704
0,75	1,02279	0,17047
0,78	1,12585	0,18764
0,82	1,21538	0,20256
0,86	1,27011	0,21169



Obrázek 25 – Graf závislosti síly na čase

Tabulka 2 ukazuje, jak se mění hodnoty práce v průběhu tváření. To je graficky znázorněno v grafu (obrázek 24).

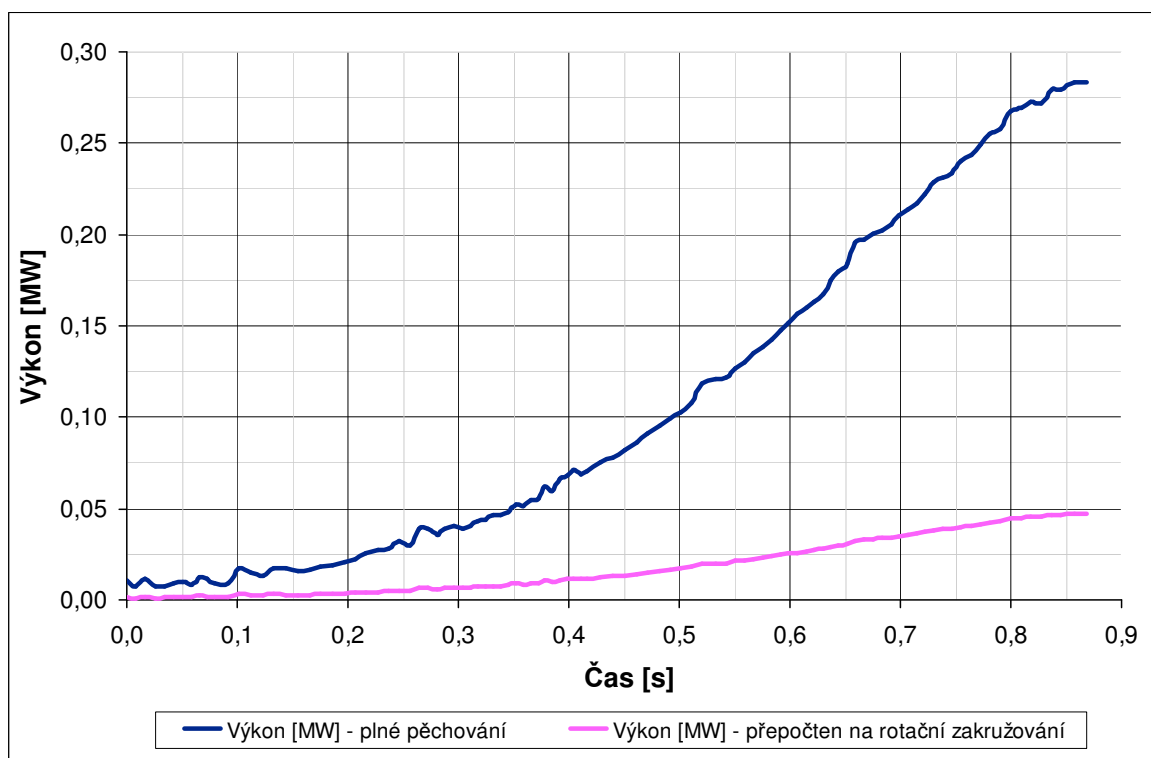
V tabulce 3 jsou pak vidět síly v průběhu procesu tváření pro plné přechování i pro přepočtené hodnoty rotačního zakružování. Tuto závislost ilustruje graf (obrázek 25).

Následující tabulka (tabulka 4) obsahuje hodnoty výkonu pro plné přechování a přepočítané hodnoty pro rotační zakružování v průběhu simulace. To je na další straně zobrazeno v grafu (obrázek 26).

Hodnoty rotačního zakružování jsem získal vynásobením hodnot plného přechování koeficientem 1/6 (viz kapitola 4.2.1). Všechny výpočty jsem prováděl v programu Excel.

Tabulka 4 – Hodnoty výkonu pro přechování a zakružování

Čas [s]	Výkon [MW] (přechování)	Výkon [MW] (zakružování)
0,00	0,01073	0,00179
0,03	0,00778	0,00130
0,07	0,01267	0,00211
0,10	0,01753	0,00292
0,14	0,01724	0,00287
0,19	0,01944	0,00324
0,23	0,02704	0,00451
0,26	0,03896	0,00649
0,30	0,04038	0,00673
0,32	0,04351	0,00725
0,35	0,05234	0,00872
0,38	0,06219	0,01037
0,40	0,07121	0,01187
0,44	0,07812	0,01302
0,48	0,09550	0,01592
0,52	0,11869	0,01978
0,56	0,13038	0,02173
0,59	0,14778	0,02463
0,62	0,16286	0,02714
0,65	0,18361	0,03060
0,68	0,20256	0,03376
0,71	0,21726	0,03621
0,75	0,23405	0,03901
0,78	0,25515	0,04253
0,82	0,27302	0,04550
0,86	0,28351	0,04725



Obrázek 26 – Graf závislosti výkonu na čase

4.4 Výpočet kroutícího momentu

Jelikož nebyla simulace rotačního zakružování úspěšně dokončena, musel jsem kroutící moment vypočítat pomocí přepočtového vzorce (24) z výkonu, získaného ze simulace plného přechování v programu QForm.

$$M_k = 60 \cdot P_{RZ} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (24)$$

Kde: P_{RZ} – výkon přepočítaný pro rotační zakružování [W] (viz Tabulka 4)

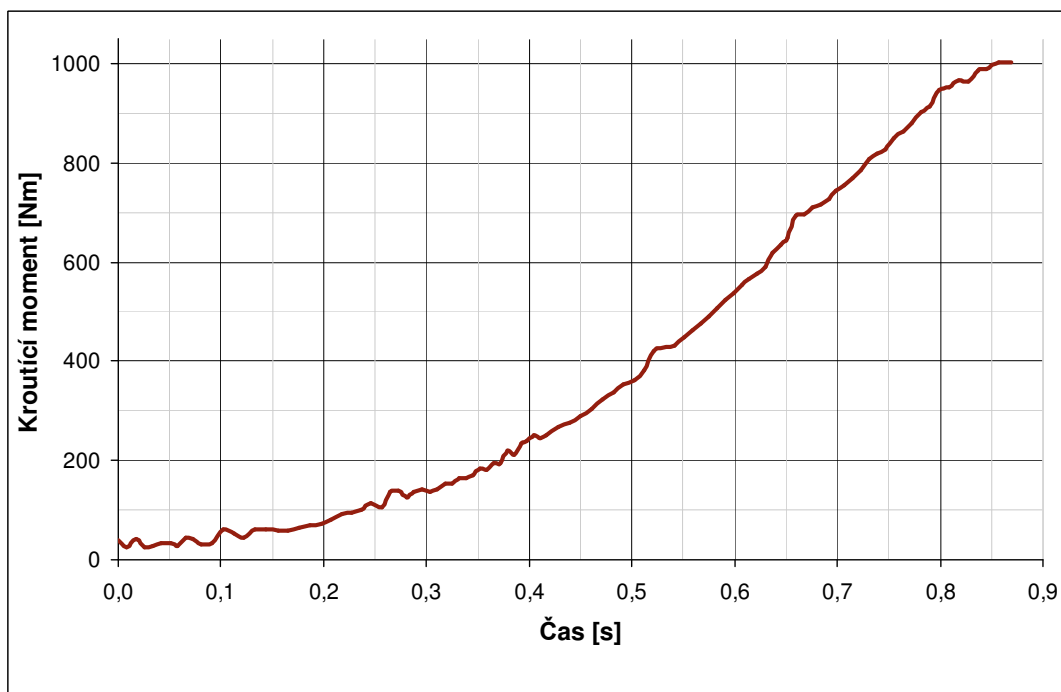
n – otáčky polotovaru [ot/min]

M_k – kroutící moment u rotačního zakružování [Nm]

Vypočtené hodnoty kroutícího momentu jsou uvedeny v tabulce 5, graficky je závislost kroutícího momentu na čase simulace zobrazena v grafu (obrázek 27).

Tabulka 5 – Vypočtené hodnoty kroutícího momentu

Čas [s]	Kroutící moment [Nm]
0,00	37,950
0,03	27,516
0,07	44,811
0,10	62,000
0,14	60,974
0,19	68,755
0,23	95,634
0,26	137,793
0,30	142,815
0,32	153,885
0,35	185,115
0,38	219,952
0,40	251,854
0,44	276,293
0,48	337,762
0,52	419,780
0,56	461,125
0,59	522,665
0,62	575,999
0,65	649,388
0,68	716,409
0,71	768,400
0,75	827,783
0,78	902,409
0,82	965,611
0,86	1002,712



Obrázek 27 – Graf závislosti kroutícího momentu na čase

4.5 Kontrola maximální síly a deformace analytickým výpočtem

Kontrolní výpočet jsem provedl podle rovnic (23) a (22) z kapitoly 3.1.

4.5.1 Kontrolní výpočet maximální síly

Výpočet maximální síly pro plné přechování provedu podle vztahu (23):

$$\begin{aligned} F_{\max-PP} &= \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot \sigma_k \\ F_{\max-PP} &= \pi \cdot 347 \cdot 13 \cdot 72,7 \\ F_{\max-PP} &= 1030284,4 \text{ N} = \underline{\underline{1,03 \text{ MN}}} \end{aligned}$$

Kde jsou:

$d_1 = 347 \text{ mm}$ (střední počáteční průměr trubky)

$s = 13 \text{ mm}$ (tloušťka stěny trubky)

$\sigma_k = 72,7 \text{ MPa}$ (mez kluzu – QForm)

Přepočítání maximální síly pro rotační zakružování:

$$F_{\max-RZ} = \frac{F_{\max-PP}}{6} = \frac{1,03}{6} = \underline{\underline{0,172 \text{ MN}}} \quad (25)$$

4.5.2 Kontrolní výpočet deformace

Pro výpočet deformace jsem použil rovnici (22).

Příklad výpočtu pro 1. řádek tabulky 6:

$$\varphi_{i\text{ celk}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{s}{4 \cdot R} \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\ln \frac{347}{347} + \frac{13}{694} \right) = \underline{\underline{0,2163}}$$

Kde jsou:

d_1 – střední počáteční průměr trubky

d_2 – střední konečný průměr trubky

s – tloušťka stěny trubky

r – poloměr oblouku zužování

R – střední poloměr oblouku zužování

$$R = r - \frac{s}{2} = 180 - \frac{13}{2} = \underline{\underline{173,5\text{mm}}} \quad (26)$$

Tabulka 6 – Hodnoty deformace z analytického výpočtu

d₂ [mm]	Φ_i celk
347,0	0,02163
336,3	0,05780
325,6	0,09513
314,9	0,13372
304,2	0,17363
293,5	0,21498
282,8	0,25786
272,1	0,30240
261,4	0,34873
250,7	0,39699
240,0	0,44735
229,3	0,50001
218,6	0,55520
207,9	0,61315
197,2	0,67416
186,5	0,73858
175,8	0,80680
165,1	0,87931
154,4	0,95668
143,7	1,03961
133,1	1,12809
122,4	1,22486
111,8	1,32946
101,2	1,44448
90,6	1,57224
80,0	1,71592

5 Závěr, diskuze dosažených výsledků

Cílem bakalářské práce bylo provést analýzu procesu rotačního tváření hrdel tlakových ocelových lahví. K simulaci procesu tvarování bylo použito programu QForm. Původně měla být simulace provedena jako rotační zakružování, nicméně tento typ simulačního procesu se nepodařilo dokončit. Program QForm nedokázal při simulaci správně rozkládat síť konečných prvků, která byla na počátku simulace nastavena správně – nejhustější na okraji polotovaru, kde působí tvářecí nástroj. Po několika krocích simulace síť prvků zhrubla, tvar polotovaru přestal odpovídat skutečnému procesu zakružování, až došlo k pádu celé simulace. Jelikož tedy nebylo možné analyzovat přímo proces rotačního zakružování, byla provedena náhradní simulace, a to plné přechování bez zakružování. Hodnoty síly a výkonu získané ze simulace plného přechování jsem přepočítal tak, aby odpovídaly úloze rotačního zakružování.

K přepočítání hodnot jsem využil úhlu dotyku rotační tvárnice a polotovaru, získaného z prvního dokončeného kroku původní zkolabované simulace. Úhel jsem pomocí AutoCadu stanovil na 60° . Z toho se dá odvodit, že zápustka při rotačním tváření působí pouze na $1/6$ objemu polotovaru oproti plnému přechování. Sílu a výkon rotačního zakružování jsem tedy dostal vynásobením hodnot síly a výkonu z plného přechování koeficientem $1/6$.

Kroutící moment jsem potom získal z přepočtového vzorce (24), do kterého se dosazuje výkon přepočtený pro rotační zakružování.

Pro ověření správnosti hodnot získaných ze simulace jsem ještě provedl analytický výpočet maximální síly a deformace podle vztahů z membránové teorie. Vypočítané hodnoty se přibližně shodují s hodnotami ze simulace, mohu tedy konstatovat, že jsou správné.

Pro návrh nového tvářecího stroje jsou podstatné maximální velikosti síly, kroutícího momentu a výkonu. Hodnoty těchto veličin dosáhly maxima na konci tvářecí operace při nulové vzdálenosti tvářecích nástrojů. Maximální hodnota síly vyšla **211,7 kN**, maximální hodnota výkonu vyšla **47,3 kW** a maximální hodnotu kroutícího momentu jsem vypočítal na **1003 Nm**.

Tyto hodnoty, zvětšené o koeficient bezpečnosti velikosti minimálně **1,2** doporučuji pro návrh nového tvářecího stroje pro rotační tváření ocelových lahví o průměru 360mm.

Mohu také konstatovat, že výkon v současnosti používaného stroje Kotrubčík 250, jehož maximální jmenovitá tvářecí síla je 6,3 MN, je plně dostačující.

6 Literatura

- [1] MARCINIAK, Zdzislaw. *Teorie tváření plechů*. Přeložil JANDURA Věslav. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964. 260 s.
- [2] TZB-info. *Nariadení č. 210/2001 Sb* [Online]. [cit.2011-05-10]. URL: <<http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-210-2001-sb>>.
- [3] VÍTKOVICE CYLINDERS. *Technologie výroby vysokotlakých ocelových láhví* [Online]. c2009 [cit.2011-05-10] URL: <<http://www.vitkovicencylinders.cz/13/cs/node/471>>.
- [4] SLÁDEK, Václav. *Schéma technologického toku výroby láhví – Provoz I* [Online]. 30.7.2008 [cit.2011-05-10]. URL: <<http://www.vitkovicencylinders.cz/default/file/download/id/4709/inline/1>>.
- [5] KATEDRA PRUŽNOSTI A PEVNOSTI. *Úvod do MKP* [Online]. 9.2.2009 [cit.2011-05-10] URL: <<http://www.339.vsb.cz/PDF/UvodDoMKP.pdf>>.
- [6] QUANTOR Ltd. *QForm verze 2.1 Nejjednodušší simulační software. Krok za krokem* [Online]. poslední aktualizace 6.10.2004 [cit.2011-05-10] URL: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/QFORM_21_cz.pdf>.
- [7] HRUBÝ, Jiří. *Tváření kovů - analýza procesů* [Online]. c2008, poslední aktualizace 19.9.2009 [cit.2011-05-10] URL: <<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/TvareniKovuAnalyzaProcesu.pdf>>.
- [8] BŘEZINA, Richard. *Technologie I. Část I. 1. vyd.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1998. 74 s. ISBN 80–7078-439–3 (brož.)
- [9] PETRUŽELKA, Jiří, HRUBÝ, Jiří. *Výpočetní metody ve tváření* [online]. 2002 [cit. 2011-05-10]. URL: <<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Skripta/VypocetMet.pdf>>.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Stacionární pochod zužování trubky [1]	9
Obrázek 2 – Závislost středního osového napětí na pA/s [1]	10
Obrázek 3 – Účinnost stacionárních lisovacích pochodů při různých tvarech nástroje [1].	11
Obrázek 4 – a) zužování obruby b) zužování dna výtažku [1]	13
Obrázek 5 – $\varphi_{i\text{ celk}}$ při přímém tažení a přehrnování [1].....	14
Obrázek 6 – Závislost poměrů $d1/2s$ na $d2/d1$ [1].....	15
Obrázek 7 – Výchozí fáze stacionárního pochodu zužování [1]	16
Obrázek 8 – Uzavírání konce trubky tažnicí [1].....	17
Obrázek 9 – Uzavírání konce trubky	22
Obrázek 10 – Těleso rozdělené na síť konečných prvků [5]	24
Obrázek 11 – Příklad aproximace skupiny dat [5]	24
Obrázek 12 – Lineární interpolační pole [6].....	25
Obrázek 13 – Vlastnosti materiálu polotovaru v QFormu.....	26
Obrázek 14 – Poskytnutý výkres sestavy tvarování hrdla	27
Obrázek 15 – Sestava pro rotační zakružování.....	28
Obrázek 16 – Sestava pro plné přechování	28
Obrázek 17 – Rozložení prvků na počátku simulace rotačního zakružování	29
Obrázek 18 – Rozložení prvků těsně před pádem simulace rotačního zakružování	29
Obrázek 19 – Plochy dotyku nástrojů s polotovarem u rotačního tváření.....	30
Obrázek 20 – Určení úhlu styku rotující zápusky s polotovarem.....	31
Obrázek 21 – Efektivní deformace	31
Obrázek 22 – Flow stress.....	32
Obrázek 23 – Teplota polotovaru	32
Obrázek 24 – Graf závislosti práce na čase	33
Obrázek 25 – Graf závislosti síly na čase	34
Obrázek 26 – Graf závislosti výkonu na čase.....	36
Obrázek 27 – Graf závislosti kroutícího momentu na čase	37

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Dovolené rozsahy mezi max. a min. obsahem legur v tavbě [2].....	18
Tabulka 2 – Hodnoty práce v závislosti na čase	33
Tabulka 3 – Hodnoty síly pro přechování a zakružování	34
Tabulka 4 – Hodnoty výkonu pro přechování a zakružování	35
Tabulka 5 – Vypočtené hodnoty kroutícího momentu	37
Tabulka 6 – Hodnoty deformace z analytického výpočtu	39

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, prof.
Ing. Jiřímu Hrubému, Csc., za odborné vedení,
poskytnutí cenných rad a pomoc při psaní této
práce.

V Ostravě 17. května 2011.